

Über die experimentellen Grundlagen der genetischen Minerallagerstättenforschung

Es sind fast 60 Jahre vergangen *), seit an der Gießener Universität zum letzten Male ein Mineraloge die Ehre hatte, Rektor zu sein. Es war REINHARD BRAUNS, der als Ordinarius für Mineralogie und Geologie von 1895 bis 1904 eine für die Gießener Mineralogie ungewöhnlich segensreiche Tätigkeit entfaltete. Im Jahre des Beginns der Wirksamkeit BRAUNS' in Gießen entdeckte WILHELM CONRAD RÖNTGEN in Würzburg die Röntgenstrahlen. Andere wesentliche Entdeckungen der Physik, Chemie und Physikalischen Chemie lagen erst kurz zurück oder schlummerten noch im Schoße der Zukunft. Aber bereits 1896 erschien die *Chemische Mineralogie* von REINHARD BRAUNS. In diesem Werk gelang es ihm als erstem, die grundlegend neuen Erkenntnisse der Chemie und Physikalischen Chemie im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts der Mineralogie nutzbar zu machen. BRAUNS gab damit der experimentell-synthetischen Forschungsrichtung in einem entscheidenden Augenblick einen neuen Impuls zu einer noch heute andauernden Entwicklung.

Unverändert gilt auch für die Mineralogie, was HERMANN VOGEL-SANG (1867) vortrefflich formuliert hat: „Endziel aller Naturwissenschaft ist und bleibt die alte Philosophenfrage nach dem Ursprung der Dinge, nach den Bedingungen ihres Daseins und nach den Ursachen ihrer Eigentümlichkeiten . . . Eine Naturwissenschaft, welche auf genetische Studien verzichtet, hört auf, Wissenschaft zu sein.“

Zur Genetik in der Biologie und Medizin, welche die Entwicklungsgeschichte des Organisch-Lebendigen umfaßt, tritt die Genetik des Anorganischen, d. h. die Entwicklungsgeschichte des Anorganisch-Leblosen auf der Erde und im Kosmos. Ihr widmen sich Mineralogie, Geologie und Geophysik, freilich auf ganz verschiedenen, methodischen Wegen. So erscheint uns der Mineraloge als Historiker der Erde. Sein Untersuchungsgebiet bildet die Erdrinde als Gesamtheit der sie aufbauenden Lagerstätten und ihrer Minerale. Sein letztes Forschungsziel ist die Entschleierung ihrer Bildungsgeschichte vom Augenblick ihrer Entstehung an bis zur Gegenwart.

Dem genetisch wirksamen Faktor Zeit kann der Mineraloge nur dadurch begegnen, daß er die genetische Deutung der Lagerstätten älterer Formationen insofern in die Gegenwart projiziert, als deren genetische Vorgänge prinzipiell nur an analogen, sich in der Jetztzeit abspielenden Prozessen studiert werden können. Diese zeitliche Kluft läßt sich glücklicherweise dadurch erfolgreich überbrücken, daß in der Regel sowohl technische Herstellungsverfahren als auch natürliche Mineral- oder Lagerstätten-bildende Prozesse ihren Produkten mehr oder weniger deutliche Spuren aufprägen, die ihrer Ent-

*) Vortrag anlässlich der Rektoratsübergabe am 17. November 1962.

stehungsweise kongruent sind und welche analytisch ermittelt werden können.

Diese Kriterien reduzieren die zur Auswahl stehenden, möglichen Entstehungsprozesse soweit, daß zur wahrscheinlichsten genetischen Deutung nur wenige verbleiben, im Idealfall nur einer. So war und ist auch in der Zukunft Mineralogie durch ihre Genetik eine beschreibende Wissenschaft. Die zentrale Bedeutung der mineralogischen Genetik geht daraus hervor, daß alles, was an Forschungsarbeit geleistet wird, ihr unmittelbar oder mittelbar dienstbar sein muß, wenn sie mineralogische Forschung heißen will.

Noch ist aber eine weitere Frage zu klären: Dürfen wir denn überhaupt so ohne weiteres die Ergebnisse der gegenwärtigen Erforschung Lagerstätten-erzeugender Prozesse auf die genetische Deutung erdgeschichtlich älterer Lagerstätten übertragen? Die Antwort fand darauf 1833 der Engländer CHARLES LYELL in seinem als „Aktualitätsprinzip“ von den erdgeschichtlichen Wissenschaften übernommenen Leitsatz; er lautet übersetzt: „Nur auf der Erde als natürlich bekannte Kräfte dürfen als wirksam angenommen werden, keine Wirkungen außer denen, deren Ursachen bekannt sind, und keine außergewöhnlichen Ereignisse behauptet werden, um eine normale Erscheinung zu erklären.“ LYELL (1833) sprach das Aktualitätsprinzip als erster aus, doch bestimmte es schon weitgehend die erdgeschichtliche Forschung seiner und der ihm vorausgegangenen Generation. Es ist implizit bereits enthalten in den Arbeiten des Deutschen KARL v. HOFF und des Engländers JAMES HUTTON um die Wende des 18. zum 19. Jahrhundert.

Das Aktualitätsprinzip hat seit LYELL mannigfaltige Formulierungen gefunden. Mir scheint, bezogen auf die Mineral- und Lagerstätten-Genetik, folgende Fassung richtig zu sein: „Die Mineral- und Lagerstätten-bildenden Prozesse waren zu allen Zeiten den Gesetzen der Physikalischen Chemie und Physik unterworfen. Ihnen zuwiderlaufende Annahmen sind falsch.“

So beruht die mineralogische Genetik auf zwei Forschungsbereichen, die auf Grund des Aktualitätsprinzips miteinander verknüpft werden dürfen: Die Bestimmung der Form, des Inhalts und des Mineralgefüges der Lagerstätten einerseits und die Erforschung der sie erzeugenden Prozesse andererseits.

Die Bestimmung der Lagerstätten-Eigenschaften erfolgt nach recht heterogenen Verfahren, die sich aber insgesamt als experimentell-analytische Methodik zusammenfassen lassen. Sie beginnen mit der Feldbeobachtung und Kartierung der Ausdehnungs- und Verbandsverhältnisse der Lagerstätten relativ zur Nachbarschaft. Es folgt die polarisationsmikroskopische Untersuchung der aufbauenden Minerale und ihres Gefüges. Nicht fehlen darf die chemische Analyse. In neuerer Zeit treten die röntgengraphische und, sofern erforderlich, elektronenoptische Methoden zur Verfeinerung und Sicherung der Diagnose hinzu.

Das Studium der mineral- und lagerstättenbildenden Vorgänge ist, wie wir bereits gesehen haben, prinzipiell auf die Beobachtung

solcher Prozesse beschränkt, die sich in der Gegenwart auf der Erde abspielen. Am nächsten liegt die Beobachtung von Vorgängen, die in der Jetztzeit zur Bildung von Minerallagerstätten führen. Einer zweiten Kategorie gehören die großtechnischen Prozesse an, die, zum größten Teil ungewollt, zu genetisch interessanten Synthesen von Mineralen und Mineralvergesellschaftungen führen. Schließlich folgen als dritte Gruppe die experimentell-synthetischen Forschungen, die aus der künstlichen Herstellung von Mineralen und Mineralvergesellschaftungen den Weg zur genetischen Deutung eröffnen.

Am deutlichsten demonstrieren uns die Produkte des rezenten Vulkanismus das Prinzip der genetischen Deutung erdgeschichtlich älterer Lagerstätten. Vor unserem Auge spielt sich die Förderung von Laven, Aschen, Bimssteinen und anderen Produkten aus tätigen Vulkanen ab. Das Studium der aus ihnen hervorgehenden Gesteine macht uns die Vulkanite älterer Formationen kenntlich. Auch die in der Gegenwart zu beobachtende Bildung von Schottern, Breccien, Sanden und Tonen läßt uns tiefer in die Genesis der älteren, sedimentären Lagerstätten eindringen.

Ganz anders ist eine zweite, ergiebige, lagerstättengenetische Informationsquelle beschaffen. Es gibt viele technische Prozesse, z. B. in der Hüttentechnik, auf den Gebieten der Schlackenverwertung und des Salinenwesens, die in der Vergangenheit und heute, meistens unbeabsichtigt, zur künstlichen Bildung von Mineralen und Mineralvergesellschaftungen geführt haben. Trotz, oder gerade wegen dieser Zufälligkeit waren sie von großem genetischem Wert und zum Teil für die spätere gezielte experimentelle Synthese richtungsweisend.

Ein für uns Gießener interessantes Beispiel mag für viele andere sprechen. JUSTUS v. LIEBIG gelang 1825 als erstem die Beobachtung des künstlichen Kalisalz-Minerals Carnallit, das sich in großen Kristallen reichlich in den Sammelkästen der Saline von Bad Salzhausen aus der Mutterlauge gebildet hatte.

Ein überaus fruchtbarer Weg eröffnete sich der mineral- und lagerstättengenetischen Forschung in der experimentellen Synthese von Mineralen und Gesteinen. Ein einfaches Beispiel mag dies erläutern: 1880 gelang es den französischen Forschern J. FOUQUÉ und A. MICHEL-LEVY durch Abkühlung einer aus Chemikalien äquivalent gemischten Schmelze nach 96stündiger, gestufter Abkühlung ein Erstarrungsprodukt zu gewinnen, welches nach qualitativem und quantitativem Mineralinhalt sowie seinem Mineralgefüge dem natürlichen Gestein Leucittephrit vollkommen ähnelte. Leucittephrit ist ein vulkanisches, alkalibasaltisches Ergußgestein, welches unter den historischen und prähistorischen Laven des Vesuvs und der mediterranen Vulkanprovinz ebenso verbreitet ist wie etwa unter den vulkanischen Gesteinen des Kaiserstuhls und anderer Vulkangebiete.

Prinzipiell wird durch eine solche Synthese im Laboratorium ein Weg ermittelt, auf welchem sich die Minerale oder Vergesellschaftungen von Mineralen in der Natur gebildet haben können. Ob dieser Weg von der Natur wirklich beschritten worden ist, lassen die Kriterien erkennen, welche die analytische Prüfung der Naturvor-

kommen ergeben kann. Im Falle der vulkanischen Gesteine steht das synthetische Experiment gleichwertig neben der in der Gegenwart möglichen Naturbeobachtung. Das synthetische Experiment gewinnt aber dort für die genetische Deutung sehr an Wert, wo es sich um Lagerstätten handelt, deren natürliche Bildung niemals beobachtbar war oder sein wird. Es sind dies die plutonischen und die metamorphen Minerallagerstätten. Die von FOUQUÉ, MICHEL-LEVY und anderen durchgeführten Mineralsynthesen zielten darauf, die Minerale und Gesteine durch ad hoc angesetzte Versuche künstlich zu erhalten. Ich bezeichne daher diese erste Verfahrensweise der experimentellen Mineralsynthese als die empirisch-präparative Methodik.

Der erste, der auf die Idee kam, Gesteine künstlich herzustellen, um damit erdgeschichtliche Hypothesen zu stützen, war um 1800 der Engländer Sir JAMES HALL. Ihm gebührt die Ehre, den experimentell-synthetischen Zweig der Mineralogie ins Leben gerufen zu haben. Bezeichnenderweise geschah das im gleichen Zeitraum, in welchem das Aktualitätsprinzip konzipiert wurde. Aber auch HALL hatte es nicht leicht, sich mit seinen Gedanken und Experimenten durchzusetzen.

HALLS Lehrer und späterer Freund war der große Engländer JAMES HUTTON, dem die Welt im letzten Drittel des 18. Jahrhunderts die Lehre von der plutonischen Bildung der Granite, Diorite und artverwandter Tiefengesteine verdankt. HUTTON hatte auch den Gedanken geäußert, daß der allgemein als Marmor bekannte, kristallin-körnige Kalkstein durch den Einfluß höherer Temperaturen und erhöhter Drucke auf ursprünglich dichte, sedimentär gebildete Kalksteine entstehe.

Schon seit 1790 drängte ihn HALL, diese für die Genetik der metamorphen Minerallagerstätten grundlegende Hypothese durch Experimente zu stützen. Aber HUTTON war, vielleicht aus der instinktiven Abneigung des ausschließlichen Naturbeobachters und daher im Laboratorium Ungewandten heraus, ablehnend. Er erließ sogar gegen die synthetisch-experimentierenden Erdgeschichtler ein heftiges, ärgerliches Verdikt, das übersetzt lautet: „Es gibt da oberflächlich denkende Menschen, die, ohne wirklich zu erkennen, was sie sehen können, glauben, die Regionen der Erde zu kennen, welche niemals dem Auge eines Menschen zugänglich sind, und welche sich das große Geschehen im Mineralreich deshalb zu beurteilen unterstellen, weil sie ein Feuerchen entzündet und auf den Boden eines Tiegelchens geblickt haben“ (GEIKIE 1905).

Sir JAMES HALL ließ sich dadurch jedoch nicht abhalten. Er entzündete dieses Feuerchen und blickte auf den Boden eines Graphittiegelchens, vorsichtshalber aber erst, und solches soll wohl auch noch heute vorkommen, nach dem 1798 erfolgten Tode seines Lehrers und Freundes HUTTON. Schon 1798 veröffentlichte Sir JAMES HALL seine *Experiments on whinstone and lava*. Sie enthalten die Ergebnisse von Schmelz- und Abkühlungsversuchen mit vulkanischen Gesteinen, darunter Laven des Vesuvs und Ätna. Je nach den Ab-

kühlungsgeschwindigkeiten erhielt er den natürlichen Gesteinen ähnliche Gläser und kristalline Produkte. Am 31. März 1801 gelang HALL durch Erhitzen unter Druck die Umwandlung sedimentären, dichten Kalksteins und Kreidekalks in kristallin-körnige, marmor-ähnliche Produkte.

Das Echo auf HALLS bahnbrechende Arbeiten kam erst spät und zögernd. Zwanzig Jahre erfolgte zunächst nichts. Erst das Jahr 1823 leitete langsam eine Periode einer etwas gesteigerten mineralsynthetischen Tätigkeit ein, die sich bis 1837 erstreckt. Wenn die während dieser 14 Jahre geglückten Synthesen auch eine nur geringe Anzahl darstellen, so beweisen die mit ihnen verbundenen Namen, daß die mineralsynthetischen Probleme die ersten Geister jener Zeit wohl zu interessieren vermochten. Neben den Deutschen EILHARD MITSCHERLICH, GUSTAV ROSE und FRIEDRICH WÖHLER stehen die Franzosen JOSEPH LOUIS GAY-LUSSAC und BERTHIER.

Etwa 1845 setzte eine stürmische Entwicklung der Mineralsynthese ein, die um die Mitte des 19. Jahrhunderts einen ersten Höhepunkt erreicht und sich bis zur Jahrhundertwende erstreckt. Das von den Franzosen F. FOUQUÉ und A. MICHEL-LEVY 1882 herausgegebene Werk *Synthèse des Minéraux et des Roches* berichtet von 147 nach 383 Verfahren geglückten Mineral-Synthesen, die zu etwa 84 Prozent von französischen und 12 Prozent von deutschen Forschern stammen, während die restlichen 4 Prozent sich auf Amerikaner, Engländer, Holländer, Österreicher, Schweizer und Norweger aufteilen. Zu dem dominierenden französischen Anteil haben beigetragen: BECQUEREL, BOURGEOIS, DAUBRÉE, DEBRAY, DUROCHER, EBELMEN, FOUQUÉ, FRÉMY, FRIEDEL, HAUTEFEUILLE, MARGOTTET, MEUNIER, MICHEL-LEVY, CHARLES und HENRI SAINTE CLAIRE-DEVILLE, SARASIN, DE SÉNARMONT und VERNEUIL, um nur die bekanntesten Namen zu nennen. Auch der meist in anderem Zusammenhang bekannte LOUIS PASTEUR ist hier mehrfach verzeichnet. Der verhältnismäßig geringe deutsche Anteil an der Mineralsynthese des 19. Jahrhunderts dürfte darin seine Begründung finden, daß eben in dieser Zeit die Einführung des Polarisationsmikroskops in die Mineralogie vorwiegend von Deutschland ausging. An der Wiege der Polarisationsmikroskopie standen die allesamt im Jahre 1832 geborenen Deutschen HARRY ROSENBUSCH, HERMANN VOGELSANG und FERDINAND ZIRKEL.

Der Ausbau und die Anwendung der mikroskopischen Methodik führte zu einer außerordentlichen Vertiefung der Kenntnisse von den Eigenschaften der Minerale, der Zusammensetzung und des Gefüges der Mineralagerstätten. Was Wunder, daß die Überzahl der Mineralogen Deutschlands und anderer Länder sich diesem, damals jüngsten und interessantesten Zweig der Mineralogie zuwandten, der zudem schneller und leichter zu wissenschaftlichen Lorbeeren führte, als die mühevolle, präparative Mineralsynthese. Dieser Stolz des seine erfolgreiche analytische Methode besonders liebenden Forschers mag FERDINAND ZIRKEL noch 1866 die nachfolgenden, feinen Spott verratenden Sätze in den Mund gelegt haben, in denen das HUTTONSche Unbehagen über die experimentierenden

Erdgeschichtler noch nach einem dreiviertel Jahrhundert nachzuklingen scheint: „Derjenige scheint noch erst in den Vorhallen der Wissenschaft zu stehen, welcher noch nicht zu der Überzeugung gelangt ist, daß die Natur im Großen unter ganz anderen Bedingungen und Verhältnissen . . . auch ganz andere Produkte zu erzeugen vermag, als der Chemiker in seinem Laboratorium.“

Doch die Erfolge der unbeirrt weiterarbeitenden, in erdrückender Überzahl französischen Mineralsynthetiker vermochten 1881 auch bereits FERDINAND ZIRKEL zu einem gerechten Urteil zu veranlassen, das als beste Würdigung der wissenschaftlichen Leistungen der Mineralsynthese im 19. Jahrhundert gelten kann: „Es darf nicht versäumt werden zu betonen, daß das Mikroskop auch der experimentierenden Geologie mit nicht geringem Nutzen zur Seite gestanden hat, indem es die getreue, materielle und strukturelle Übereinstimmung der künstlich im Laboratorium erhaltenen Produkte mit den natürlichen Gebilden nachwies und so deren Nachahmung als in der Tat gelungen glaubhaft macht.

Gerade die letzten Jahre haben auf diesem Gebiete, welches, Dutzenden lang als unfruchtbar und öde geltend, fast gemieden wurde, die erstaunenswerten und für immer denkwürdigen Resultate von FOUQUÉ und MICHEL-LEVY zu verzeichnen, welche dem alten Ruhm der experimentierenden französischen Forscher neuen Glanz hinzufügten . . . Sie hatten das beneidenswerte Glück, so eine Menge, gerade für die Felsarten wichtigen Mineralien zu erzeugen, verschiedene Feldspate, Augit, Leucit, Nephelin Granat . . . Ja, es ist ihnen darauf auch gelungen, unter Bedingungen, deren Vorhandensein in der Natur keineswegs bestritten werden kann, sogar ganz typische Gesteinsmassen als Erstarrungsprodukte künstlicher Schmelzmassen zu erhalten, Augitandesit, Leucittephrit, leibhaftigen Basalt, dieselben mikroskopischen Gemengteile und dasselbe Gefüge aufweisend, wie jene Felsarten, die aus der unermesslichen unterirdischen Werkstatt herstammen.“

Das letzte Drittel des 19. Jahrhunderts schenkte der physikalisch-chemischen Forschung eine Reihe von fundamentalen Entdeckungen. Ihre Übertragung auf die Mineralogie — des Verdienstes REINHARD BRAUNS' hieran haben wir eingangs bereits gedacht — bewirkte auf großen Gebieten der Mineralsynthese die Aufwärtsentwicklung der bisher empirisch-präparativ gehandhabten zur streng physikalisch-chemischen Methodik. Als besonders fruchtbar erwies sich neben dem 1867 entdeckten chemischen Massenwirkungsgesetz das 1874 von dem Amerikaner JOHN WILLIARD GIBBS gefundene und formulierte Phasengesetz. Dieses ermöglichte erst, die Gleichgewichtszustände kristallisierender, hochtemperierter Schmelzen, wässriger oder organischer Lösungen qualitativ zu überschauen. Das Phasengesetz stellt die Art und Anzahl der aus Schmelzen oder Lösungen ausgeschiedenen Kristallarten in Zusammenhang mit den Kristallisations-Temperaturen und -Drucken und der chemischen Zusammensetzung der ursprünglichen Schmelzen bzw. Lösungen. Zudem sagt

das Phasengesetz aus über die Kristallisationsfolge in polynären Schmelzen u. a. m.

Der große Wert des Phasengesetzes für die mineralogische Genetik wird sofort daran erkennbar, daß es sich bei Mineral- und Lagerstättenbildungen fast ausschließlich um Kristallisationsprozesse aus Schmelzen und Lösungen handelt. Dafür hat uns kein Geringerer als JACOBUS HENRICUS VAN'T HOFF ein klassisches Beispiel gegeben. VAN'T HOFF, mit knapp 28 Jahren ordentlicher Professor für Chemie, Mineralogie und Geologie an der soeben gegründeten Universität Amsterdam, seit 1896 Professor für Chemie an der Universität Berlin, wurde 1901 der erste Nobelpreisträger für Chemie neben Röntgen als erstem Nobelpreisträger für Physik.

VAN'T HOFF schuf in zwölfjähriger physikalisch-chemischer Forschung, unterstützt von etwa 30 Mitarbeitern, die wesentlichen experimentellen und theoretischen Grundlagen für die genetische Deutung und Bildung mariner Salzlagerstätten (VAN'T HOFF 1905). Er verfolgte die Methode, zunächst an einfachen Salz-Wasser-Systemen die Kristallisations-Gleichgewichte bei genau bekannten Konzentrationen und Temperaturen zu studieren. Danach variierte er die Anzahl der in der Lösung befindlichen Salze, deren Konzentrationen und Temperaturen. So ließ sich schließlich das Kristallisationsverhalten einer beliebigen Salzlösung beim Eindampfen unter bestimmten Bedingungen voraussagen und das Verdampfen des Meerwassers als Sonderfall darstellen. Damit gelang VAN'T HOFF als erstem in großen Zügen die Lösung des genetischen Problems der Bildung mariner Salzlagerstätten, namentlich unserer deutschen Salzlagerstätten des Zechsteins und Tertiärs.

Aber nicht nur in Deutschland erhielt die physikalisch-chemische Mineralogie und damit die Lagerstättengenetik am Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts entscheidende Impulse. Im Jahre 1901 nahm das Geophysikalische Laboratorium des CARNEGIE-Institutes in Washington seine Arbeit auf. Seitdem bildet die physikalisch-chemische und besonders die phasentheoretische Erforschung mineral- und lagerstättengenetischer wichtiger Systeme, vor allem der Silikate und Sulfide, den Kern des Arbeitsprogrammes dieses Instituts. Es war in Würdigung der Kostspieligkeit der experimentellen Studien in der chemischen Mineralogie für das Geophysikalische Institut in Washington ein Glück, von vornherein durch die CARNEGIE-Stiftung mit Sachmitteln und Mitarbeitern großzügig ausgestattet zu sein.

Ähnlich wie die empirisch präparative Mineralsynthese in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, die unbestrittene Domäne der französischen Forscher war, verlagerte sich nunmehr der Schwerpunkt der physikalisch-chemischen Mineralsynthese nach den Vereinigten Staaten von Amerika. Ohne die Fülle der in den vergangenen Jahren dort errungenen experimentellen Ergebnisse wären die seitdem verzeichneten Fortschritte auf dem Gebiet der mineralogischen Genetik undenkbar. Die hochtemperierten, silikatischen Schmelzsysteme und ihre Kristallisations-Gleichgewichte bei Atmosphären-

druck waren Forschungsobjekt der physikalisch-chemischen Mineralogie in den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts bis etwa zum Beginn des Zweiten Weltkrieges. So gelangten wir zur fundierten, experimentellen Grundlage des genetischen Verständnisses der Art und des Verlaufes der magmatischen Kristallisationen, die bei der Bildung der oberflächen- und tiefevulkanischen Minerallagerstätten der wesentliche Vorgang sind.

Es würde bedeuten, die historische Wahrheit zu fälschen, wollte man behaupten, daß die Wissenschaftler an den Instituten der deutschen Universitäten und Hochschulen, und unter diesen besonders die der mineralogischen Institute, jemals hätten in Geld waten können. Dennoch dürfen wir nach VAN'T HOFF auch im 20. Jahrhundert einen angemessenen deutschen Anteil an den Fortschritten der physikalisch-chemischen Mineralogie verzeichnen. Dies verdanken wir vorwiegend drei Mineralogen.

Zunächst ist der gebürtige Holländer HENDRIK E. BOEKE zu nennen. Auf ihn gehen neben wertvollen theoretischen und experimentellen Spezialarbeiten die erste, heute noch aktuelle Darstellung der experimentellen Grundlagen der physikalisch-chemischen Mineralogie auf phasentheoretischer Grundlage zurück (BOEKE 1915). — Die Werke des Schweizers PAUL NIGGLI (1920, 1923, 1937) verdienen deshalb besondere Hervorhebung, weil er, die heutige Entwicklung voraussehend, auch den Einfluß und die Wirksamkeit leichtflüchtiger Substanzen auf das Kristallisationsgeschehen in sonst aus schwerflüchtigen Substanzen bestehenden Systemen mit einbezog. Allerdings mußte NIGGLI notgedrungen deshalb mehr auf theoretischem Gebiet verbleiben und wählte seine Beispiele unter Mischungen aus schwer- und leichtflüchtigen, organischen Substanzen aus, weil nur diese bei dem damaligen Stand der Experimentalltechnik, namentlich hinsichtlich der Systemdrucke, beherrschbar waren.

In VAN'T HOFFS Monographie über die *Bildung ozeanischer Salz-lagerstätten* finden wir bereits zweimal einen jungen Mineralogen zitiert, dessen wissenschaftliches Erstlingswerk (1907) zum Kristallisationsverhalten binärer Salzgemische Wesentliches auszusagen wußte. Mit dieser Veröffentlichung begann RICHARD NACKENS Wirken auf dem Gebiet der experimentellen, physikalisch-chemischen Mineralogie. Dieses führte in der Forschertätigkeit eines halben Jahrhunderts zu einer Fülle von experimentellen und theoretischen Ergebnissen. NACKENS Arbeiten an Systemen von Salz-Phosphat- und Silikat-Mineralen, über physikalisch-chemische Probleme des Kristallwachstums in Schmelzen und Lösungen sowie die Konstitution und das Abbinden hydraulischer Mörtel haben die Begründung und Entwicklung der physikalisch-chemischen Mineralogie in Deutschland fundamental gefördert¹⁾.

¹⁾ Während der akademischen Feier des Rektoratswechsels an der Justus Liebig-Universität am 17. 11. 1963 wurde die Ehrenpromotion des Herrn Professor Dr. phil. RICHARD NACKEN zum Dr. rer. nat. h. c. der Gießener Naturwissenschaftlich-Philosophischen Fakultät verkündet.

NACKEN war es auch, der zusammen mit seinen Frankfurter Mitarbeitern zu Beginn des Zweiten Weltkrieges die experimentelle Erforschung hydrothermaler Systeme einleitete. Es handelt sich hierbei um das Studium der Reaktionen hochtemperierten Wassers ohne und mit Zusätzen, mit Quarz, Silikaten, Sulfaten, Karbonaten und anderen Mineralen und ihrer Gleichgewichte. Ein erstes Ergebnis dieser Forschungsarbeit waren die experimentellen Grundlagen der Quarz-Synthese, die heute im großtechnischen Stil durchgeführt wird. Dieses Ergebnis hat zum wiederholten Male bewiesen, daß mineralogische Forschungen Veranlassungen zu erheblichen technischen Fortschritten werden können. Wie diese synthetische Züchtung reiner Quarzkristalle, geeignet für Schwingquarze zur Steuerung von Funkwellen, können auch die Produkte anderer Mineralsynthesen an die Stelle erschöpfter Naturvorkommen treten.

Die hydrothermale Forschung ist zur Zeit das aktuelle Thema der experimentellen, physikalisch-chemischen Mineralogie. Sie führt zum genetischen Verständnis der Mineralbildung in metamorphen Lagerstätten. Die Gesteine der kristallinen Grundgebirge, z. B. Gneise, Glimmerschiefer, Phyllite, Quarzite und Marmore, können wir als Vertreter dieser Lagerstättengruppe nennen. Seit HUTTON und HALL sind sie als Gesteine erkannt, die sich aus Sedimentgesteinen, Tonen, Sanden, Sandsteinen und Kalken, oder aus Eruptivgesteinen durch den umwandelnden Einfluß erhöhter Temperaturen und Drucke im Erdinnern bilden können. Die Beteiligung wasserhaltiger Minerale am Aufbau dieser Gesteine im Verein mit anderen Erscheinungen deuten darauf hin, daß Wasser oder wässrige Lösungen in mehr oder weniger erhitztem Zustand bei diesen Lagerstättenmetamorphosen als umwandelndes Agens wirksam waren. Wie sich diese Um- und Neukristallisationen vollzogen haben können, vermögen analytische Studien erst im Verein mit den Erkenntnissen zu vermitteln, welche sich aus der hydrothermalen Forschung ergeben.

Es gibt ferner eine Reihe von bestimmten Kriterien dafür, daß auch in den tiefen- und oberflächenvulkanischen Schmelzen leichtflüchtige Substanzen gelöst sind. Unter diesen fällt dem Wasser wiederum eine dominierende Rolle zu. Seine Anwesenheit modifiziert die silikatische Hauptkristallisation und ermöglicht erst die einer Destillation gleichkommende Anreicherung einer Reihe von Elementen in hydrothermalen wässrigen Lösungsphasen, die zu einer späteren Lagerstättenbildung von Schwermetallen und selteneren Elementen führen kann.

Dementsprechend umfassen die hydrothermalen Versuche nicht nur die Reaktionen und Gleichgewichte einer erhitzten, wässrigen Lösungsphase mit Mineralen bzw. Kristallen. Auch das Studium des Kristallisationsverhaltens wasserhaltiger Schmelzen anorganischer Substanzen bei hohen Temperaturen ist erforderlich. Dies bedingt mehrere erhebliche Schwierigkeiten: Der Temperaturbereich von etwa 100° C bis hoch über 1000° C hinaus ist naturnotwendig mit hohen bis sehr hohen Wasserdrücken verbunden, die leicht bis zu mehreren tausend Atmosphären betragen können. Auch treten die

kritischen Erscheinungen des Wassers ins Spiel. Hydrothermal experimentieren heißt also Druckgefäße benutzen, deren Herstellung kostspielig und zeitraubend und deren Gebrauch sichtbehindernd und experimentell schwierig ist.

Ich freue mich, hier eine Gießener Arbeit des HANLE-Schülers ALBRECHT FISCHER (1958) hervorheben zu können, der einen Ofen konstruierte, der ein sicheres Arbeiten bis zu 2500°C unter dem Druck eines inerten Gases bis zu 150 Atm. gestattet. Nun haben wir es aber mit Wasser zu tun, welches bei höheren Temperaturen zunehmend chemisch aggressiv wird. Immerhin haben wir im Gießener Mineralogisch-Petrologischen Institut bis zu 600°C und 2100 Atm. sicher experimentiert.

Unsere Arbeiten auf dem Gebiete der genetischen Minerallagerstätten-Lehre beruhen zum Teil noch auf der empirisch-präparativen Methodik. So mußte mein Mitarbeiter R. BLASCHKE (1962) in einer demnächst vorzulegenden Dissertation über die Basalte von Ortenberg im Vogelsberg auf die streng phasentheoretische Behandlung der Probleme verzichten, weil die chemische Zusammensetzung der Basalte dafür einstweilen noch zu kompliziert ist. Durch Wiederaufschmelzung der Basalte und Abkühlung unter variierenden Bedingungen gelang es ihm, bisher als Korrosionswirkung betrachtete, unvollkommene Kristallbegrenzungen als Folge überhasteten Wachstums bei schneller Abkühlung nachzuweisen.

Nach streng physikalisch-chemischer Methodik jedoch erfolgte die experimentelle und theoretische Untersuchung von binären hydrothermalen Systemen von Zimmertemperatur an bis zu 600°C sowie vom Atmosphärendruck an bis zu 2500 Atm. Immerhin gelang uns, nachzuweisen, daß der SiO_2 -Gehalt in hydrothermalen, mit Quarz im Gleichgewicht stehenden wässrigen Mischphasen zwischen 115°C und 620°C und Drucken bis zu 2500 Atm. durch ein thermodynamisch fundiertes Gesetz ausgedrückt werden kann (MOSEBACH 1955, 1957 a, b). Da die Anzahl der zur Nachprüfung dieses Gesetzes geeigneten Systeme bisher gering war, hat mein Mitarbeiter G. STRÜBEL (1962) eine Dissertation vorgelegt, welche die experimentelle Bestimmung der Konzentrationsverhältnisse des Flußspates, Baryts, Cölestins und Anglesits im Wasser zwischen Zimmertemperatur und 600°C sowie Drucken bis 2000 Atm. enthält, dazu die Beeinflussung dieser Konzentrationen durch variierenden NaCl-Zusatz zwischen 20°C und 100°C . Wir haben bereits nachgewiesen, daß auch der CaF_2 -Gehalt der hydrothermalen Mischphase im System CaF_2 (Flußspat)- H_2O durch ein ähnliches Gesetz darstellbar ist (MOSEBACH 1962).

Ich habe mir erlaubt, meine Ausführungen über die experimentellen Grundlagen zur genetischen Erforschung der Minerallagerstätten mit einem kurzen Überblick über den kleinen Ausschnitt unserer Forschungsvorhaben abzuschließen. Daß dies überhaupt möglich war, verdankt die Universität der Leitz-Stiftung, die vor vier Jahren im Zusammenwirken mit dem Lande Hessen und der Universität zur Wiedererrichtung des Lehrstuhles und des Institutes für Minera-

logie und Petrologie geführt hat. Sie verdankt es ferner den Mitgliedern des Vereins der Hessischen Industrie und der Gießener Hochschulgeseilschaft, die dem soeben wiedergegründeten Institut erste Finanzhilfe angedeihen ließen.

Die Hessische Staatsregierung, das Staatsbauamt, die Stadt und Universität Gießen sorgten zudem dafür, daß seit über Jahresfrist ein Institut zur Verfügung steht, welches die Gießener Mineralogen in die Lage versetzt, an der modernsten mineralogischen Forschung angemessen Anteil zu nehmen.

Daß aber neben den Aufgaben, die durch die Einrichtung eines provisorischen Institutes, die Planung des neuen Institutes und die Veranstaltung des akademischen Unterrichtes anfielen, überhaupt noch wissenschaftliche Forschung möglich war, deren erste Ergebnisse bereits vorliegen, beruht neben der selbstverständlichen Pflichterfüllung aller meiner Mitarbeiter auf der kollegialen, selbstverleugnenden Fürsorge, welche die Mineralogie bei allen Mitgliedern der Naturwissenschaftlich-Philosophischen Fakultät gefunden hat. Hierfür an dieser Stelle noch einmal besonders zu danken, ist für mich ein ebenso großes Bedürfnis, wie auch für die verantwortungsbewußten Bemühungen meiner verehrten Herren Kollegen Professor Dr. E. LEHMANN und Professor Dr. S. RÖSCH, die materiellen und ideellen Reste des alten Institutes für eine bessere Zukunft zu retten.

Möge uns dieser Geist der kollegialen, opferbereiten Fürsorge und des verantwortungsbewußten Willens zum Wiederauf- und Ausbau unserer Justus Liebig-Universität auch in der Zukunft erhalten bleiben,

zum Wohle unserer Universität,
zum Wohle unserer akademischen Jugend,
zum Wohle unseres Volkes!

Literaturverzeichnis

1. BLASCHKE, R.: *Zur Petrologie der Basalte von Ortenberg und ihrer Sandstein einschlüsse*. Diss. Gießen 1962.
2. BOEKE, H. E.: *Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie*. 428 S. (Gebr. Borntraeger) Berlin 1915.
3. BRAUNS, R.: *Chemische Mineralogie*. 460 S. (Chr. Herm. Tauchnitz) Leipzig 1896.
4. FOUQUÉ, F., u. MICHEL-LEVY, A.: *Synthèse des minéraux et des roches*. 423 S. (G. Masson) Paris 1882.
5. HALL, J.: *Edinb. Roy. Soc. Transact.*, 1801. 65, 347—365.
6. HALL, J.: *Experiments on whinstone and lava*, 1797. — *Edinb. Roy. Soc. Transact.* t V, 1805. — *The Journal of Geology*, 65.
7. VAN'T HOFF, J. H.: *Zur Bildung der ozeanischen Salzablagerungen* I, VI, 85 S. (Vieweg und Sohn) Braunschweig 1905; II, VI, 90 S. (Vieweg und Sohn) Braunschweig 1909.

8. HUTTON, J.: *Theory of the earth, or an investigation of the laws in the composition, dissolution and restauration of land upon the globe*. 1 Edit. Edinburgh 1785; 2. Edition: *Theory of the earth with proofs and illustrations in four parts*. Edinburgh 1795.
9. HUTTON, J.: s. b. GEIKIE, A.: *The founders of Geology*. XI, 486 S., S. 318—319, London 21905.
10. LIEBIG, J.: *Karstens Archiv* 9. S. 316—319, 1826.
11. LYELL, Ch.: *Principles of Geology*. — 1 Ed. London 1833.
12. LYELL, Ch.: *Grundzüge der Geologie*. — Weimar 1842.
13. MOSEBACH, R.: *Die hydrothermale Löslichkeit des Quarzes als heterogenes Gasgleichgewicht*. — *N. Jb. f. Min. Abh.*, 87, S. 351—388, Stuttgart 1955.
14. MOSEBACH, R.: *Zur Technik und Methodik der hydrothermalen Kristallzüchtung*. — *Sprechsaal f. Keramik, Glas, Email*, 90, Coburg 1957.
15. MOSEBACH, R.: *Thermodynamic Behavior of Quarz and other Forms of Silica in Pure Water at elevated Temperatures and Pressures with Condu-sions on their Mechanism of Solution*. — *The Journal of Geology*, 65, S. 347—363, 1957.
16. MOSEBACH, R.: *In Landolt-Börnstein*. Bd. II, Teil 2: *Gleichgewichte außer Schmelzgleichgewichten*. S. 3—295, VI. Auflage (Springer) Berlin, Göttingen, Heidelberg 1962.
17. NACKEN, R.: *Über die Bildung und Umwandlung von Mischkristallen und Doppelsalzen in den binären Systemen der dimorphen Sulfate von Lithium, Natrium, Kalium und Silber*. Diss. Göttingen 1907, *N. Jb. f. Min. BB.* 24, Stuttgart 1907.
18. NACKEN, R.: *Über Langbeinit und Vanthoffit ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ und $3Na_2SO_4 \cdot MgSO_4$)* — *Nachr. d. Ges. d. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Kl.* 1—12, Göttingen 1907.
19. NIGGLI, P.: *Die leichtflüchtigen Bestandteile im Magma*. Leipzig 1920.
20. NIGGLI, P.: *Gesteins- und Mineralprovinzen*. I. zusammen mit J. BEGER. (Borntraeger) Berlin 1923
21. NIGGLI, P.: *Das Magma und seine Produkte, unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der leichtflüchtigen Bestandteile*. Leipzig 1937.
22. STRÜBEL, G.: *Quantitative Untersuchungen über die hydrothermale Löslichkeit des Flußspates, Baryts, Cölestins und Anglesits und deren Löslichkeit im Wasser und wässerigen NaCl-Lösungen zwischen 20° C und 100° C*. Diss. Gießen 1962.
23. VOGELSANG, H.: *Philosophie der Geologie und mikroskopische Gesteinsstudien*. — 229 S., 10 Taf., (Max Cohen u. Sohn) Bonn 1867.
24. ZIRKEL, F.: *Über die mikroskopische Zusammensetzung und Structur der diesjährigen Larven von Nea Kammeni*. — *N. Jb. f. Min.*, S. 769—787, 1866.
25. ZIRKEL, F.: *Dekanatsrede der Universität Leipzig*, 1881.